

**CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE
PARTÍCULAS SÓLIDAS PRESENTES EM
TUBULAÇÕES DE UM SISTEMA DE
ESGOTAMENTO SANITÁRIO DO TIPO
UNITÁRIO: UM ESTUDO DE CASO NA CIDADE
DE QUÉBEC (CANADÁ)**

Julia Campos Dotto

JULIA CAMPOS DOTTO

**CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE
PARTICULAS SÓLIDAS PRESENTES EM TUBULAÇÕES DE
UM SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DO TIPO
UNITÁRIO: UM ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE QUÉBEC
(CANADÁ)**

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte
dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação
em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Peter A. Vanrolleghem
Orientador na UFSC: Prof. César A. Pompêo

FLORIANÓPOLIS,
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Dotto, Julia Campos

Caracterização do comportamento de partículas sólidas presentes em tubulações de um sistema de esgotamento sanitário do tipo unitário : um estudo de caso na cidade de Québec (Canadá) / Julia Campos Dotto ; orientador, Peter A. Vanrolleghem, coorientador, César A. Pompêo, 2017.

61 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Sólidos suspensos. 3. Velocidade de sedimentação de partículas. 4. First-flush. 5. Sistema unitário. I. Vanrolleghem, Peter A. . II. Pompêo, César A.. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL

**CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE
PARTICULAS SÓLIDAS PRESENTES EM TUBULAÇÕES DE
UM SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DO TIPO
UNITÁRIO: UM ESTUDO DE CASO NA CIDADE DE QUÉBEC
(CANADÁ)**

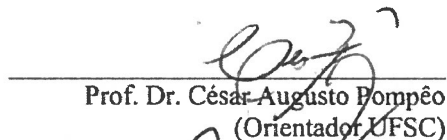
JULIA CAMPOS DOTTO

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte
dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação
em Engenharia Sanitária e Ambiental.

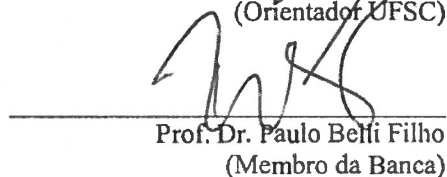
BANCA EXAMINADORA:



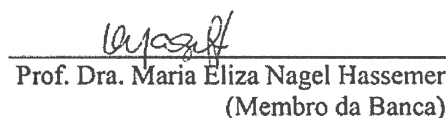
Prof. Dr. Peter A. Vanrolleghem
(Orientador Université Laval)



Prof. Dr. César Augusto Pompêo
(Orientador UFSC)



Prof. Dr. Paulo Belfi Filho
(Membro da Banca)



Prof. Dra. Maria Eliza Nagel Hassemer
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, JULHO/2017

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Izaura, que durante os últimos vinte e quatro anos dedicou todo seu tempo à minha formação, proporcionando condições para que esta e tantas outras etapas fossem vencidas.

Aos meus tios, Jonas e Ângela, que também sempre me apoiaram e estiveram presentes em tantos momentos.

A equipe modelEAU e a todos os meus amigos da *Université Laval*, que me receberam de braços abertos.

Ao professor Peter A. Vanrolleghem, quem me ofereceu a oportunidade de realizar este trabalho em um ambiente de excelência, bem como o de vivenciar uma experiência incrível no exterior.

Aos membros da banca, Professor Paulo Belli Filho e Professora Maria Eliza Nagel Hassemer, por aceitarem meu convite com muito carinho e incentivo.

Ao Professor Cesar Pompêo, por ter aceitado cumprir o papel de orientador na UFSC e por quem tenho um grande carinho.

Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC, por todo conhecimento transmitido durante os seis últimos anos.

E aos amigos que se fizeram presentes durante essa jornada e os quais deixarão boas lembranças.

A vocês, muito obrigada!

RESUMO

Sistemas de esgotamento sanitário do tipo unitário caracterizam-se pelo transporte de águas residuárias e pluviais em um mesmo conduto. Embora adotado por países como França e Canadá, a gestão e operação desse tipo de concepção requer atenção redobrada quando comparada aos sistemas separadores absolutos, uma vez que a ocorrência de chuvas intensas pode levar a um aumento considerável do volume a ser transportado obrigando o desvio e lançamento de parte do efluente bruto em corpos em um processo conhecido como *combined sewer overflow* (CSO). CSOs são considerados as principais fontes de poluição antrópica em rios urbanos, devido especialmente à sua elevada carga de sólidos suspensos (SS), provenientes, sobretudo, do arraste pela água da chuva das partículas depositadas sobre superfícies impermeáveis durante um período seco. Tradicionalmente, partículas sólidas são avaliadas em termos de teor de sólidos suspensos. Entretanto, pesquisas mostraram que não somente sua concentração deve ser considerada, mas também sua sedimentabilidade, avaliada por meio de uma curva de distribuição de velocidades de sedimentação (DVSP). Nesse contexto e a partir da hipótese de que a adição de água pluvial altera o comportamento das partículas sólidas transportadas em águas residuárias em sistemas de esgotamento do tipo unitário, uma campanha de monitoramento foi desenvolvida durante o mês de junho de 2017 na rede de esgoto da cidade de Québec (Canada). Seus resultados, ainda que limitados, permitiram a confirmação de um padrão de distribuição de concentração durante tempo seco apresentado em literaturas. Em relação ao evento chuvoso, observou-se um aumento considerável na concentração de sólidos após aproximadamente quatro horas do início da chuva, resultado do efeito do *first-flush* que causa a ressuspensão das partículas depositadas no fundo dos condutos durante um período seco. Para os resultados de sedimentabilidade, observou-se que quanto maior a concentração de sólidos da amostra, maior a fração de partículas com elevadas velocidades de sedimentação. Além do mais, pôde-se prever a fração de partículas que serão retidas no tratamento primário do efluente, uma vez que o clarificador primário da estação de tratamento da cidade de Québec foi dimensionado de forma a reter partículas com velocidade de sedimentação igual ou superior a 1,6 m/h.

PALAVRAS-CHAVE: Sólidos suspensos. Velocidade de sedimentação de partículas. *First-flush*. Sistema unitário.

ABSTRACT

A combined sewer system consists of a network of pipelines designed to collect both sewage and surface runoff and to convey the mixed wastewater to a designated wastewater treatment plant. Although very common in countries as France, England and Canada, this concept of sewer system has shown to be quite problematic in some cases. When the occurrence of intense rainfall is high, the capacity of the conveyance system is easily exceeded obligating the deviation of the surplus flow to surface water bodies before its treatment in a process known as “combined sewer overflow”, or CSO. CSOs are considered the major source of anthropic pollution of urban rivers especially due to its high concentration of suspended solids (SS). This pollution mainly originates from the wash-off of pollutants accumulated on impervious surfaces during a dry weather period between two rainy events. Traditionally, solid particles are evaluated in terms of total suspended solids concentrations. However, studies have shown that not only their concentration should be studied, but mainly their settleability, evaluated by the analysis of particle settling velocity distribution (PSVD) curves. In this context and based on the hypothesis that the behavior of solid particles transported in a combined sewer differs between dry and wet weather, a sampling campaign was conducted in June of 2017 in the sewer system of Quebec City (Canada). With the aim of characterizing the solid particles, samples were collected and evaluated in terms of SS and settling velocity. Despite the constraints faced, the results allowed to confirm information presented in the literature especially regarding the daily pattern generally observed for the concentration of solid particles during dry weather. It was also possible to observe the first-flush effect, responsible for the resuspension of solid particles that settled at the bottom of the sewer during a dry weather period. The study was conducted with the support of the modelEAU team led by Professor Peter A. Vanrolleghem, as well as a partnership between Université Laval and Quebec City.

KEY WORDS: Suspended solids. Particle settling velocity. First-flush. Combined sewer system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Hidrograma resultante de uma campanha de monitoramento realizada em uma rede unitária de esgoto na cidade de Norwich, Reino Unido.....	26
Figura 2 – Dados de precipitação (a) e vazão (b) resultantes de uma campanha de monitoramento realizada na rede de esgotos de Bruxelas em 1988.....	27
Figura 3 – Distribuição diária de vazão (Q) e de concentração de sólidos suspensos (SS) resultantes de uma campanha de monitoramento realizada na rede de esgotos de Bruxelas em 1988.....	29
Figura 4 – Equipamento utilizado para o teste de elutriação localizado no laboratório de Engenharia Civil e Engenharia das Águas da Universidade Laval (Québec, Canadá).....	32
Figura 5 – ViCAs: preenchimento das colunas e nível d'água	34
Figura 6 – Exemplo da divisão da curva DVSP em cinco classes.	35
Figura 7– Esboço das redes de esgotamento sanitário Leste (em verde) e Oeste (em vermelho).	38
Figura 8– Identificação dos tanques de retenção posicionados ao longo da rede Leste e suas respectivas bacias de drenagem.....	39
Figura 9 – Esboço da ocupação da bacia de St.-Sacrement e indicação da localização do tanque de retenção (TR) e da câmara de controle U225.41	
Figura 10 – Câmara de controle de St.-Sacrement (U225).....	42
Figura 11 – Indicação do ponto de amostragem dentro da câmara U225.	42
Figura 12 – Amostrador automático SIGMA 900max (HACH®).	43
Figura 13 – Radar meteorológico para previsão do tempo.....	45
Figura 14 – Coluna de sedimentação utilizada no teste ViCAs.	47
Figura 15 – Distribuição da concentração de sólidos suspensos totais (SST) durante as primeiras horas da manhã.	49
Figura 16 – Distribuição da concentração de sólidos suspensos totais (SST) durante período compreendido entre final da manhã e início da tarde.....	50
Figura 17 – Distribuição da concentração de sólidos suspensos totais (SST) durante o final de tarde.	51
Figura 18 – Distribuição da velocidade de sedimentação das partículas das amostras coletadas durante os três períodos observados. Em parênteses, a concentração inicial de cada amostra.....	52
Figura 19 – Distribuição da concentração de sólidos suspensos totais (SST) durante evento chuvoso e dados de precipitação.	54

Figura 20 – Distribuição da velocidade de sedimentação das partículas das amostras coletadas durante evento chuvoso. Em parênteses, a concentrações inicial de cada amostra. 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre valores extremos de vazão e sólidos suspensos resultantes de uma campanha de monitoramento realizada na rede de esgotos de Bruxelas em 1988.	29
Tabela 2 – Informações sobre a bacia de drenagem Saint-Sacrement...	40
Tabela 3 – Informações sobre a campanha de amostragem realizada. ...	46

LISTA DE ABREVIATURAS

CSO	<i>Combined Sewer Overflow</i>
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DVSP	Distribuição da Velocidade de Sedimentação das Partículas
EPA	United States Environmental Protection Agency
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
SST	Sólidos Suspensos Totais
TR	Tanque de Retenção
ViCAs	Velocidade de Sedimentação em Águas Residuárias
v_s	Velocidade de Sedimentação das partículas
VSS	Sólidos Suspensos Voláteis

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 OBJETIVOS.....	21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
4 METODOLOGIA	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

Diferentemente do sistema de esgotamento sanitário do tipo separador absoluto, no qual águas pluviais e residuárias são coletadas e transportadas em redes completamente independentes, o sistema combinado (ou unitário) é projetado de forma a coletar ambas as águas e transportá-las, juntas, até uma estação de tratamento de efluentes (ETE).

Como consequência, esse tipo de sistema é afetado consideravelmente durante a ocorrência de eventos chuvosos intensos, resultando em um aumento significativo no volume/fluxo transportado pelos condutos. Uma vez atingida a capacidade das tubulações o volume excedente é geralmente extravasado para corpos hídricos próximos, em um processo conhecido como *combined sewer overflow* (CSO) – considerado a principal fonte de poluição antrópica em rios urbanos, devido especialmente à sua elevada concentração de partículas sólidas.

Nas últimas décadas, órgãos ambientais internacionais – a exemplo dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency – EPA*) e Canadá (*Environment Canada*) – lançaram uma série de políticas determinando a redução dos CSOs o que resultou na construção de tanques de retenção (TRs) ao longo das redes de esgoto. Tratam-se, pois, de enormes sedimentadores que permitem o desvio e armazenamento do volume excedente até que as condições padrões sejam retomadas e o efluente possa então ser redirecionado ao seu tratamento. Durante o armazenamento, parte dos sólidos sedimentam, resultando em um efluente de melhor qualidade e contribuindo, assim, com a eficiência das ETes.

Partículas sólidas são consideradas os principais poluentes transportados em sistemas combinados de esgoto. Sob condições ambientais secas, sua distribuição ao longo do tempo segue geralmente um padrão diário e semanal; entretanto, quando considerada a adição de águas pluviais, sua distribuição caracteriza-se por sua grande variabilidade, diferindo não somente entre um evento e outro, mas também ao longo de um mesmo evento.

Tradicionalmente, partículas sólidas são avaliadas em termos de teor de sólidos suspensos totais (SST). Entretanto, pesquisas mostraram que não somente sua concentração deve ser considerada, mas também sua sedimentabilidade, avaliada a partir da distribuição das velocidades de sedimentação das partículas (DVSP), sobretudo quando há interesse na previsão e modelagem da qualidade do efluente transportado.

Nesse contexto, e a partir da hipótese que características de partículas sólidas transportadas em águas residuárias em sistemas de esgoto combinado variam para tempos secos e úmidos, uma campanha de monitoramento foi desenvolvida durante o mês de junho de 2017 na rede de esgoto da cidade de Québec (Canadá). O estudo contou com o suporte da equipe modelEAU, liderada pelo professor Peter A. Vanrolleghem, e com uma colaboração entre a Universidade Laval e a Prefeitura de Québec.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar as características e o comportamento de partículas sólidas transportadas ao longo de uma rede de um sistema combinado de esgoto em termos de concentração (SST e SSV) e sedimentabilidade (DVSP), bem como sua variabilidade entre tempos seco (ausência de chuva) e úmido (ocorrência de chuva).

2.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar a variabilidade da concentração (em termos de SST, SSV) e comportamento (em termos de DVSP) das partículas em função da variação horária de fluxo característica de tempos secos;
- b) Analisar a influência da contribuição de água pluvial sobre a concentração (em termos de SST, SSV) e o comportamento (em termos de DVSP) das partículas;
- c) Análise do efeito do *first-flush*.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica busca dar sustentação ao tema no qual este trabalho se baseia: a caracterização e análise do comportamento das partículas transportadas ao longo de um sistema combinado de esgoto tanto para tempo seco (ausência de chuva) quanto para tempo de úmido (ocorrência de chuva). Para tanto, serão inicialmente abordados assuntos mais gerais, como a origem dos sistemas de esgotamento sanitário, até mais específicos, como a definição de velocidade de sedimentação de partículas (v_s) e apresentação de duas técnicas geralmente empregadas para sua caracterização.

3.1 Evolução Histórica dos Sistemas de Esgotamento Sanitário

O conceito atual de um sistema de esgotamento sanitário compreende a coleta e transporte de efluentes doméstico e/ou industriais (e, em alguns casos, a coleta e transporte de água da chuva) ao longo de uma extensa rede de condutos até uma estação de tratamento de efluentes (ETE) onde é submetido a uma série de tratamentos físico-químico-biológicos até que conformidades ambientais sejam alcançadas, permitindo seu lançamento em um corpo hídrico receptor. Entretanto, nem sempre foi assim.

Os primeiros sistemas de esgotos, cujas evidências remontam à Idade Antiga, não tinham o propósito de tratamento, mas sim do transporte, o mais rápido possível, da água da chuva e do esgoto sanitário até corpos hídricos. É o caso do Império Mesopotâmico (3500 a 2500 A.C), durante o qual casas eram ligadas a drenos de águas pluviais de forma a levar o esgoto para longe, ou da Grécia Antiga, quando latrinas públicas eram ligadas à condutos que transportavam o esgoto e a água da chuva para fora da cidade (LENS *et al.*, 2001).

A construção de dutos para transporte de esgotos e águas pluviais também foi adotada durante o Império Romano, sendo a Cloaca Máxima de Roma o maior exemplo de canal subterrâneo para esgotamento sanitário (TSUTIYA, 2005). Entretanto, com o colapso do império, essa prática foi deixada de lado de forma que o principal local de disposição dos rejeitos (sólidos ou líquidos) nas cidades europeias passaram a ser as ruas: acumulavam-se os rejeitos em recipientes e os lançavam pelas janelas.

Essa falta de saneamento é apontada como a principal causa da propagação da cólera durante a década de 1830, que resultou na morte de milhares de pessoas. Assim, a partir da segunda metade do século XIX,

idades europeias passaram a investir em técnicas de saneamento, resultando na construção e expansão das redes de esgotamento de grandes cidades europeias, como Paris e Londres, onde foram assentados quilômetros de tubulações destinadas à coleta e transporte de água da chuva juntamente com esgoto doméstico e industrial (DE FEO *et al.*, 2014), dando assim origem ao hoje conhecido como “sistema de esgotamento unitário”.

3.2 Sistemas de Esgotamento Unitário

Um sistema de esgotamento unitário (ou combinado) consiste, pois, em uma rede de tubulações dimensionadas de forma a coletar tanto o esgoto doméstico e/ou industrial quanto as águas de origem pluvial e transportá-los, em um mesmo conduto, até uma estação de tratamento de efluentes.

Embora muito comum em países como França, Inglaterra e Canadá, essa concepção se mostra bastante problemática quando a ocorrência de eventos chuvosos intensos e derretimento da camada de neve acumulada. Durante esses eventos, o volume a ser transportado passa a ser muito maior do que aquele suportado pela rede - chegando à ordem de 100 vezes mais (LENS *et al.*, 2001; TSUTIYA, 2005) –, obrigando o lançamento de uma parcela do efluente em corpos hídricos, lançamentos esses denominados, no inglês, *combined sewer overflows* (ou CSOs).

Os CSOs compreendem uma das principais fontes antrópicas de poluição em rios urbanos, devido especialmente à sua elevada carga de sólidos suspensos (TIK *et al.*, 2016). Por conta disso, uma série de políticas ambientais passaram a ser lançadas em diferentes países.

Nos estados Unidos, por exemplo, a Agência de Proteção Ambiental (EPA) emitiu em 1914 uma política de controle dos CSOs, apelando para que as comunidades os reduzissem dramaticamente (TIBBETTS, 2005). Segundo Tibbetts (2005), duas alternativas foram expostas pela EPA para redução dos CSOs, sendo uma delas a construção de tanques de retenção (TRs) ao longo das redes de esgotos. Analogamente, foram lançadas na década de 90 novas políticas ambientais na cidade de Quebec, Canadá, como resultado de um programa de renaturalização dos Rios Saint-Charles e Saint-Lawrence, levando à construção de mais de 100.000 m³ de tanques de retenção (FRADET *et al.*, 2011)

Tanques de retenção são enormes escavações subterrâneas com paredes revestidas por material resistente que, durante eventos críticos, recebem parte do efluente transportado pelos condutos e o armazenam até que as condições hidráulicas iniciais sejam retomadas. Durante o tempo

de armazenamento, parte dos sólidos sedimentam, de forma que seu dimensionamento depende não somente do volume a ser armazenado, mas também do volume que será ocupado pelos sólidos sedimentados.

Destaca-se, pois, a grande importância da predeterminação da quantidade (aspectos hidráulicos) e qualidade do efluente que chega até os tanques considerando diferentes cenários, principalmente em relação as partículas sólidas transportadas – assunto do presente trabalho.

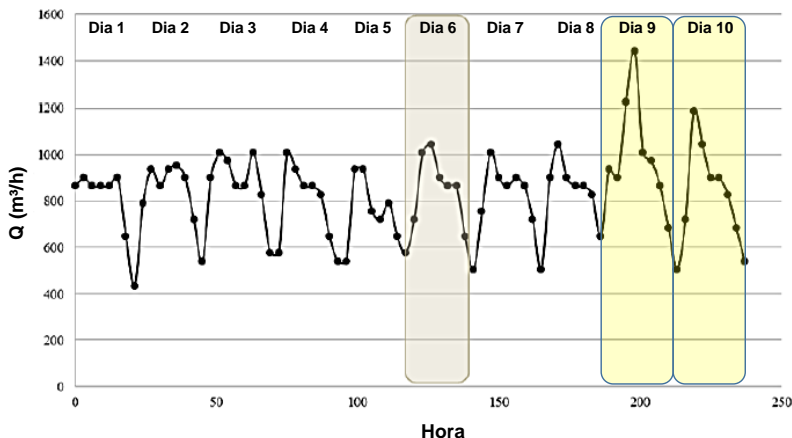
3.3 Dinâmica Hidráulica em Sistemas Combinados de Esgoto

Conforme mencionado anteriormente, a ocorrência de chuvas intensas e o derretimento de neve acumulada aumentam consideravelmente o volume/vazão transportados pelos condutos quando considerados sistemas combinados de esgoto.

Nos países nórdicos, o período seco corresponde aos meses entre novembro e março (inverno). Observa-se que durante esse período do ano o fluxo transportado segue um padrão diário e semanal (VERBANCK, 1995).

A Figura 1 mostra o hidrograma, adaptado de Lessard & Beck (1990), o qual exemplifica esse padrão.

Figura 1 – Hidrograma resultante de uma campanha de monitoramento realizada em uma rede unitária de esgoto na cidade de Norwich, Reino Unido.



Fonte: adaptado de Lessard (1989).

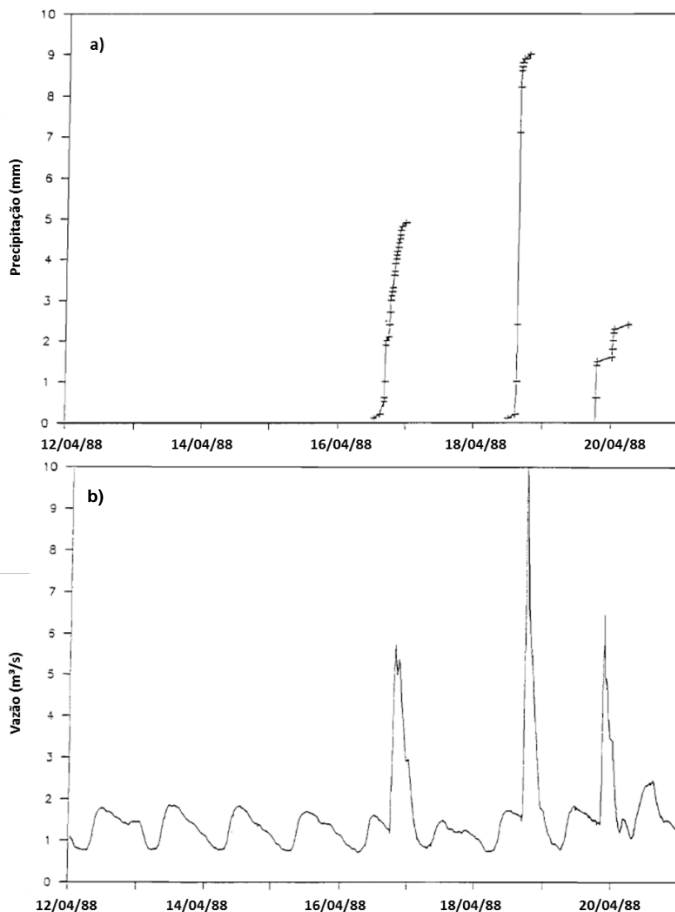
A área destacada em cinza (dia 6) traz um padrão típico observado para tempos secos e seus dois picos característicos: observa-se um aumento no fluxo durante as primeiras horas da manhã, quando a população começa a acordar, alcançando seu pico em torno de meio-dia. Um segundo pico pode ser observado no final da tarde, quando as pessoas retornam do trabalho e reiniciam suas atividades. O final da noite é então representado pelos vales, nos quais pequenas variações podem ser atribuídas à eventuais infiltrações do lençol freático (VERBANCK, 1995; MARUEJOULS, 2012).

A área destacada em amarelo (dia 9, especificamente), por sua vez, exemplifica o efeito causado pela contribuição da água de drenagem superficial resultante de um evento chuvoso. Observa-se um aumento considerável (> 40%) no pico, variando de aproximadamente 1000 m³/h para mais de 1400 m³/h.

Nota-se, pois, que diferentemente do observado durante estações secas, estações chuvosas apresentam uma grande variabilidade. Destaca-se, porém, que essa variabilidade depende não somente da intensidade da precipitação ocorrida, mas também das condições ambientais (TIK *et al.*, 2014) como duração do período de seca, além de características físicas da bacia de drenagem considerada, como seu tamanho, sua declividade, parcela de área impermeável, grau de saturação e taxa de infiltração do solo, etc.

Os efeitos da contribuição de águas pluviais também foram registrados por Verbanck (1995) em um estudo realizado na rede de esgotos de Bruxelas em 1988 (Figura 2).

Figura 2 – Dados de precipitação (a) e vazão (b) resultantes de uma campanha de monitoramento realizada na rede de esgotos de Bruxelas em 1988.



Fonte: adaptado de Verbanck (1995).

A Figura 2 traz dados de três eventos chuvosos ocorridos em Bruxelas em 1988, cada qual resultando em diferentes vazões (Figura 2b) medidos no exutório do sistema considerado.

Em seu trabalho, Verbanck (1995) também registrou a relação entre precipitação/vazão dentro de um conduto e a concentração de partículas sólidas transportadas. O capítulo seguinte traz informações mais aprofundadas a esse respeito.

3.4 Qualidade do Efluente Transportado em Redes Combinadas de Esgoto

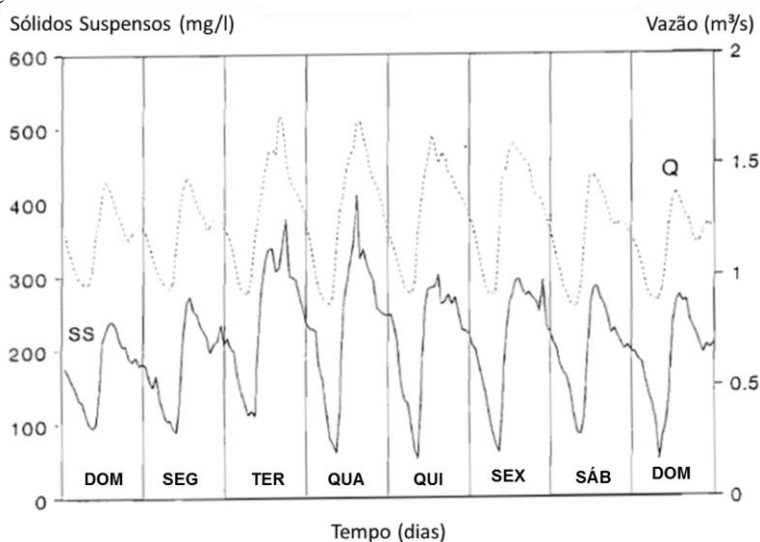
Devido à sua riqueza em matéria orgânica, esgotos domésticos são geralmente avaliados em termos de Demanda Química e Bioquímica de Oxigênio (DQO e DBO) e em termos de nutrientes (nitrogênio e fósforo). No entanto, quando considerada a “adição” de águas pluviais, destaca-se um outro fator importante: a presença de partículas sólidas suspensas.

Segundo vários autores (MARUEJOULS *et al.*, 2011; HANNOUCHE *et al.*, 2011; MARUEJOUS *et al.*, 2012; TIK *et al.*, 2016) sólidos suspensos são considerados os principais poluentes transportados em esgotos combinados durante eventos chuvosos, sendo sua principal origem o arraste pela água da chuva das partículas depositadas em ruas, terrenos e telhados (SILVAGNI *et al.*, 2014).

Quando em grandes concentrações, partículas sólidas suspensas aumentam a turbidez da água reduzindo assim a penetração da luz e trazendo, conseqüentemente, impactos à biodiversidade local (MARUEJOULS, 2012). Além do mais, sua superfície favorece a adsorção de poluentes como pesticidas e metais pesados.

Verbanck (1995), cujo trabalho foi comentado anteriormente, também mostrou que a distribuição da concentração de partículas em esgotos combinados segue o padrão de distribuição de vazão, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Distribuição diária de vazão (Q) e de concentração de sólidos suspensos (SS) resultantes de uma campanha de monitoramento realizada na rede de esgotos de Bruxelas em 1988.



Fonte: adaptado de Verbanck (1995).

Pode-se notar da Figura 3 os picos e vales característicos tanto para a distribuição de vazão quanto para a distribuição de sólidos suspensos. Destaca-se, porém, que a diferença entre os valores mínimos (vales) e máximos (picos) para concentrações de SS é consideravelmente maior quando comparada àquela entre valores máximos e mínimos para a vazão. Essa comparação é melhor apresentada pela Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre valores extremos de vazão e sólidos suspensos resultantes de uma campanha de monitoramento realizada na rede de esgotos de Bruxelas em 1988.

	Mínimo	Máximo	Variabilidade
Vazão (m³/s)	0,80	1,60	100 %
SST (mg/l)	50	400	800 %

Fonte: adaptado de Verbanck (1995).

A diferença de variabilidade entre ambos os parâmetros pode ser atribuída à ressuspensão das partículas – devido a um aumento da vazão observado a partir do período da manhã – que sedimentaram no fundo dos condutos durante a madrugada. Maiores vazões resultam em um aumento

na tensão de cisalhamento nas paredes das tubulações, causando a erosão e, conseqüentemente, a ressuspensão e transporte das partículas ali depositadas.

Segundo Silvagnil *et al.* (2017), são inúmeros os problemas resultantes da presença e acúmulo de partículas sólidas em tubulações de esgoto, dentre os quais destacam-se os problemas funcionais (bloqueio de tubulações, deterioração de equipamentos mecânicos), estruturais (abrasão de paredes) e ambientais (CSOs). Crabtree (1989) menciona que até 90% da carga de poluição de CSOs pode ser atribuída à ressuspensão/erosão de partículas acumuladas ao longo das tubulações, de forma que sua previsão pode ser uma ferramenta importante não somente para o manejo e dimensionamento das tubulações propriamente ditas, mas também para as demais estruturas que complementam o sistema, como por exemplos os tanques de retenção.

Tradicionalmente, partículas sólidas são avaliadas em termos de concentração de Sólidos Suspensos Totais (SST) (PIRO *et al.*, 2011) e sua distribuição de formato e tamanho (CHEBBO & GROMAIRE, 2009). Entretanto, durante as últimas décadas, pesquisas mostraram que não apenas a concentração das partículas deve ser estudada, mas, principalmente, sua sedimentabilidade, avaliada em termos de velocidade de sedimentação (v_s).

3.4.1 Velocidade de Sedimentação das Partículas (v_s)

A velocidade de sedimentação (v_s) é a característica mais relevante se tratando de partículas sólidas (HERRICK & NEUMAYER, 2015). Trata-se de um parâmetro-chave para a previsão da qualidade de águas residuárias transportadas ao longo de tubulações de esgoto, tanto para tempos secos quanto para tempos úmidos (MARUEJOULS *et al.*, 2014). A velocidade de sedimentação de partículas sólidas pode ser estimada por meio da Lei de Stokes (Equação 1) a partir da presunção que as partículas transportadas são homogêneas, perfeitamente esféricas e com dimensões entre 0,0002 mm e 0,2 mm (TOMAZ, 2011).

$$v_s \text{ (m/s)} = \frac{(\rho_s - \rho) \times d^2}{18 \times \mu} \quad (1)$$

Onde ρ_s e ρ são, respectivamente, o peso específico da partícula e do líquido (N/m^3); d é o diâmetro das partículas (mm) e μ é a viscosidade dinâmica do líquido (N.s/m^2).

Sabe-se, porém, que partículas presentes em águas residuárias são altamente heterogêneas, tanto em tamanho como em formato, índice de refração, composição, etc. (BERTRAND-KRAJEWSKI *et al.*, 2010; HANNOUCHE *et al.*, 2011) de forma que calcular suas diferentes velocidades de sedimentação, de acordo com seu tamanho e densidade – conforme sugerido pela Lei de Stokes –, torna-se uma atividade desafiadora e inviável.

Tendo isso em vista, passaram-se a desenvolver estudos focados na tentativa de encontrar um melhor método para a determinação das velocidades de sedimentação das partículas, dentre os quais pode-se citar o teste de elutriação (do inglês, “*elutriation test*”), desenvolvido e validado por Krishnappan *et al.* (2004) e o teste ViCAs (abreviação francesa para “velocidade de sedimentação em águas residuárias”), desenvolvido por Chebbo & Gromaire (2009).

3.4.2 O Teste de Elutriação

O equipamento para o teste elutriação consiste em uma “versão adaptada do sistema proposto por Walling Woodward (1993) para a medição da distribuição do tamanho dos sólidos suspensos presentes em rios” (KRISHNAPPAN *et al.*, 2004). Ele compreende um conjunto de compartimentos de decantação cilíndricos/cônicos cujos diâmetros aumentam progressivamente (ver Figura 4) de forma que a velocidade do fluxo ascendente difira em cada compartimento.

O experimento inicia-se com o preenchimento dos compartimentos de decantação com água potável. Uma vez preenchidos, bombas peristálticas passam a coletar a amostra de esgoto e a bombeá-la para o sistema. Os pontos de entrada e saída de cada cilindro/cone são posicionados de forma que a amostra entra em cada compartimento por baixo e o deixa por cima, seguindo assim um padrão espiral. “Tal disposição permite que partículas com velocidades de sedimentação superiores àquela do líquido ascendente sedimentem no fundo do compartimento” (KRISHNAPPAN *et al.*, 2004) resultando na caracterização de partículas de diferentes classes.

Segundo Krishnappan *et al.* (2004), tal equipamento se beneficia de sua capacidade de determinar a distribuição das velocidades de sedimentação de partículas sob condições dinâmicas (presença de fluxo) sendo, portanto, melhor representativo quando comparado a outros métodos.

A Figura 4 apresenta o equipamento utilizado para o teste de elutriação cujos diâmetros dos compartimentos de decantação aumentam da direita para a esquerda.

Figura 4 – Equipamento utilizado para o teste de elutriação localizado no laboratório de Engenharia Civil e Engenharia das Águas da Universidade Laval (Québec, Canadá).



Fonte: do autor.

3.4.3 O Teste ViCAs

ViCAs (no francês, “*vitesse de chute en assainissement*”) é um teste desenvolvido por Chebbo & Gromaire (2009) para determinação das fração mássica (%) das partículas correspondentes à diferentes velocidades de sedimentação (v_s) em uma coluna sob condições estáticas, promovendo um melhor entendimento do processo de sedimentação das partículas presentes em uma amostra de esgoto.

Tik *et al.* (2014) descreveram o protocolo a ser seguido para a realização do teste conforme segue:

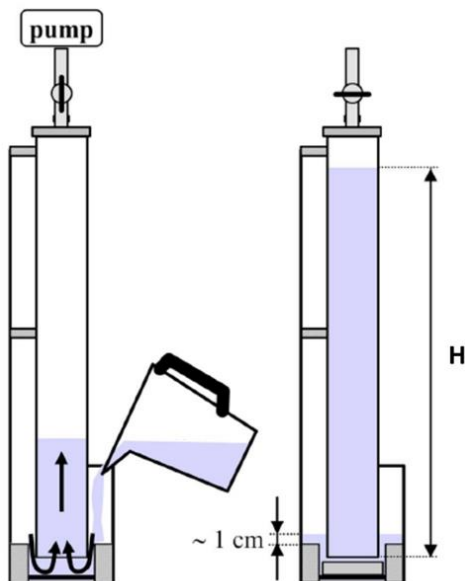
*O experimento consiste em preencher uma coluna de diâmetro 60cm com amostra **homogênea** de esgoto, dando início a um processo de sedimentação em condição estática. Uma série de cúpulas são posicionadas sequencialmente – de acordo com intervalos de tempo pré-determinados - no fundo da coluna para coletar as partículas que sedimentam. Os sólidos coletados em cada cúpula são então quantificados e uma curva de massa acumulada é interpretada resultando na então chamada “distribuição da velocidade de sedimentação das partículas” presentes na amostra.*

Da descrição acima, pode-se destacar um termo chave: “amostra homogênea”. O teste ViCAs baseia-se na premissa de que uma suspensão homogênea seria a única forma de evitar alterações e interferências na amostra; assim, homogeneizá-la constitui o primeiro passo para a sua realização. A partir de então, assume-se que as partículas são independentes uma das outras, livre da formação de agregados e do efeito da difusão (TORFS & DAIGGER, 2016).

Segundo Chebbo & Gromaire (2009), a dificuldade deste método homogêneo reside no fato que as partículas, distribuídas ao longo da coluna, não sedimentam a partir de uma mesma altura. Assim, a quantificação dos sólidos coletados no fundo da coluna a cada intervalo de tempo ($t_i ; t_{i+1}$) associa-se a uma classe de partículas cuja velocidade de sedimentação (v_s) é igual ou inferior à $\{H/(t_i ; t_{i+1})\}$, onde H corresponde à altura da coluna.

A Figura 5 traz um esboço de coluna usada para o teste ViCAs.

Figura 5 – ViCAs: preenchimento das colunas e nível d'água

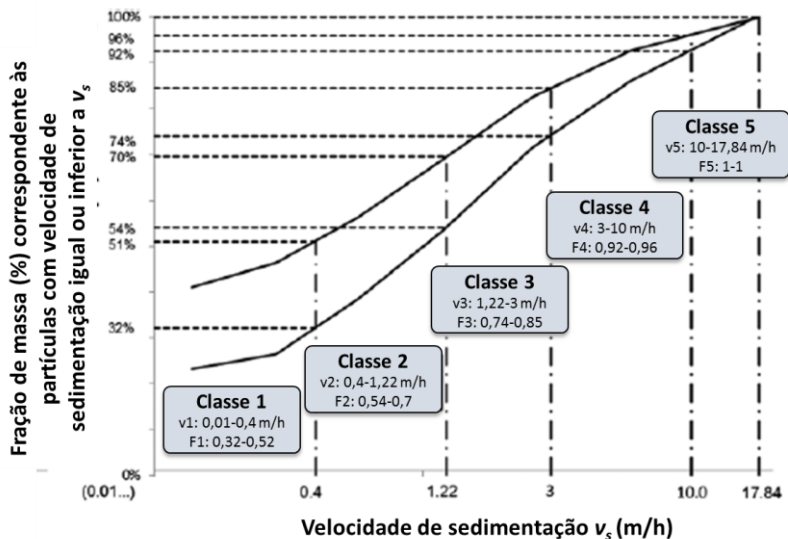


Fonte: adaptado de Chebbo & Gromaire (2009).

Conforme comentado anteriormente, partículas sólidas contidas em águas residuárias estão sujeitas a uma grande variabilidade. Assim, visando a obtenção de resultados mais confiáveis, múltiplos testes ViCAs devem ser realizados e analisados resultando em diferentes curvas DVSP. A região em que a maioria das curvas são observadas é então destacada pelos limites superior e inferior e sua análise permite uma divisão das partículas em classes, cada qual representada por uma velocidade de sedimentação característica.

A Figura 6, retirada de Bachis *et al.* (2014), traz um exemplo da divisão em classes.

Figura 6 – Exemplo da divisão da curva DVSP em cinco classes.



Fonte: adaptado de Bachis *et al.* (2014).

As velocidades de sedimentação características de cada classe (v_{si}) são determinadas a partir de uma média geométrica entre as velocidades de sedimentação inferior ($v_{si(inf)}$) e superior ($v_{si(sup)}$) de cada classe (equação 2).

$$v_{si} = \sqrt{(v_{si(inf)} \times v_{si(sup)})} \quad (2)$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção a metodologia proposta para a caracterização das partículas sólidas presentes em uma rede de esgoto no contexto do estudo de caso considerado é apresentada.

Para tanto, a área de estudo – uma bacia de drenagem localizada na cidade de Quebec, Canadá – é inicialmente apresentada; na sequência, traz-se detalhes a respeito da campanha de amostragem, realizada durante o mês de junho de 2017. Por fim, o protocolo seguido para a realização das análises laboratoriais é apresentado.

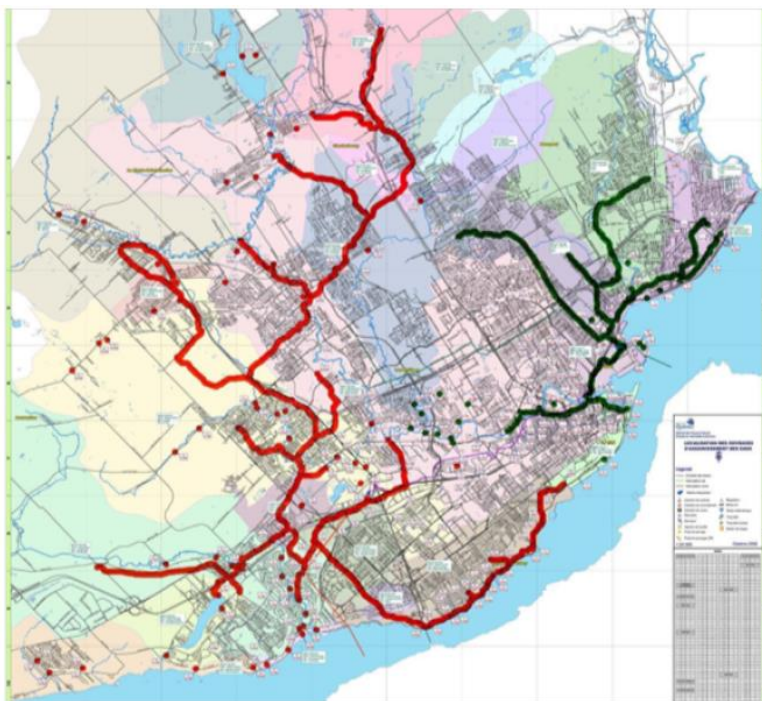
4.1 Local de Estudo e Pontos de Monitoramento: Bacia de Drenagem de Saint-Sacrement

Quebec é capital da província do Quebec (Canadá) localizada na confluência entre os rios Saint-Charles e Saint-Lawrence, tendo este funcionado com esgoto a céu aberto até as décadas de 60 e 70 (TIK, 2014).

Atualmente, a cidade de Quebec conta com duas redes de esgotamento sanitário independentes entre si e que, juntas, drenam uma área de aproximadamente 550 km². Cada sistema conduz o efluente coletado para diferentes estações de tratamento, denominadas Leste (Estação Beauport) e Oeste.

A Figura 7 traz um esboço da abrangência das duas redes de esgotamento sanitário da cidade de Quebec, estando a rede Leste destacada na cor verde e a rede Oeste, na cor vermelha.

Figura 7– Esboço das redes de esgotamento sanitário Leste (em verde) e Oeste (em vermelho).

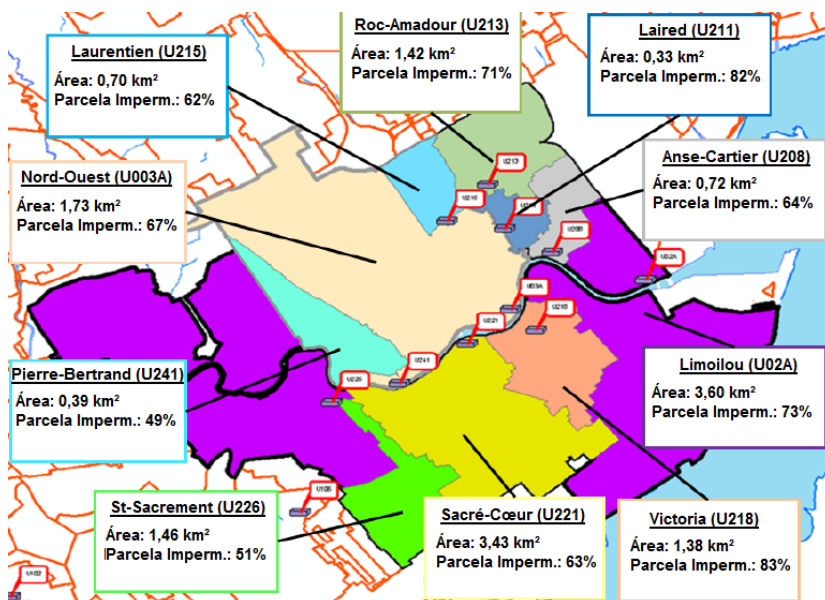


Fonte: Maruéjols (2012).

Como resultado de um programa do governo para a renaturalização dos rios Saint-Charles e Saint-Lawrence (1995-2009), quatorze tanques de retenção (TR) foram construídos com o objetivo de reduzir o lançamento de CSOs nos rios durante eventos chuvosos intensos. Desses, quatro estão posicionados ao longo da rede Oeste e dez ao longo da rede Leste, somando uma capacidade de armazenamento de 124.557 m³. Uma bacia de drenagem foi determinada para cada TR, dentre as quais selecionou-se a bacia de Saint-Sacrement como referência para o presente estudo. É a partir dela que o sistema passa a ser do tipo unitário.

A Figura 8 esquematiza os dez tanques de retenção posicionados ao longo da rede Leste e suas respectivas bacias de drenagem.

Figura 8– Identificação dos tanques de retenção posicionados ao longo da rede Leste e suas respectivas bacias de drenagem.



Fonte: adaptado de Maruéjols (2012).

A bacia de Saint-Sacrement abrange uma área de aproximadamente 1,46 km² dos quais 51% correspondem a superfícies impermeáveis. Entre as regiões de montante (predominantemente residencial) e de jusante (predominantemente industrial), há uma diferença de altitude de aproximadamente 70m resultando em uma declividade bastante acentuada, o que contribui para o transporte e acumulação de sedimentos no ponto exutório.

A Tabela 2 traz dados a respeito das características físicas da bacia e seu número estimado de habitantes.

Tabela 2 – Informações sobre a bacia de drenagem Saint-Sacrement.

Dimensões	Área total	1,46 km ²
	Área impermeável	0,74 km ²
Uso do solo	Instituições	28 %
	Residencial	41 %
	Comercial	12 %
	Industrial	12 %
	Áreas verdes	7 %
Outros	Tempo de concentração	26 min
	População estimada	5.200 hab

Fonte: adaptado de Maruejouis *et al.* (2011).

A seleção da bacia de St.-Sacrement deu-se em função de fatores como sua proximidade da universidade, onde foram feitas as análises, sua representatividade em relação às demais bacias (tamanho, ocupação do solo) e também por contar com um ponto de monitoramento estratégico (câmara de controle U225) já utilizado em projetos anteriores.

A câmara de controle (em francês, “*chambre de contrôle*”) faz parte do sistema do tanque de retenção (TR). Durante tempo seco, a câmara recebe o efluente proveniente da tubulação coletora e o envia diretamente para a tubulação interceptora (ver Figura 9) que o conduz até a estação de tratamento de Beauport. Durante eventos chuvosos, quando o nível da água sobe, parte do efluente é dirigido ao tanque de retenção onde fica armazenado até que condições normais sejam retomadas e o efluente possa retornar à tubulação interceptora.

A Figura 9 traz um esboço do zoneamento da bacia, bem como a localização do tanque de retenção (TR) e da câmara de controle, apresentadas em mais detalhes nas Figuras 10 e 11.

Figura 9 – Esboço da ocupação da bacia de St.-Sacrement e indicação da localização do tanque de retenção (TR) e da câmara de controle U225.



Fonte: adaptado de Maruejouis (2014).

Figura 10 – Câmara de controle de St.-Sacrement (U225).



Fonte: do autor.

Figura 11 – Indicação do ponto de amostragem dentro da câmara U225.



Fonte: do autor.

4.2 Campanha de Monitoramento e Amostragem

Uma campanha de monitoramento foi conduzida no verão durante o qual se observa uma maior ocorrência de eventos chuvosos, permitindo assim uma melhor representatividade dos efeitos das estações úmidas sobre o comportamento das partículas transportadas ao longo de condutos de um sistema unitário.

Durante o mês de monitoramento (junho de 2017) foram coletadas amostras para 6 eventos diferentes: 5 na ausência de chuva (tempo seco) e 1 durante as primeiras horas de um evento chuvoso. Para tanto, utilizou-se o amostrador automático *SIGMA 900max*, desenvolvido pela empresa HACH® (Figura 12). Trata-se de um equipamento automático refrigerado (4 °C) composto por um tambor rotativo contendo vinte e quatro garrafas com capacidade de 1 litro cada, uma bomba peristáltica e uma mangueira para coleta da amostra conforme um intervalo de tempo pré-determinado.

Figura 12 – Amostrador automático *SIGMA 900max* (HACH®).



Fonte: Catálogo HACH®.

Os procedimentos de amostragem adotados durante os eventos secos e chuvosos são apresentados nos tópicos 4.2.1 e 4.2.2.

4.2.1 Amostragem em Tempo Seco (ausência de chuva)

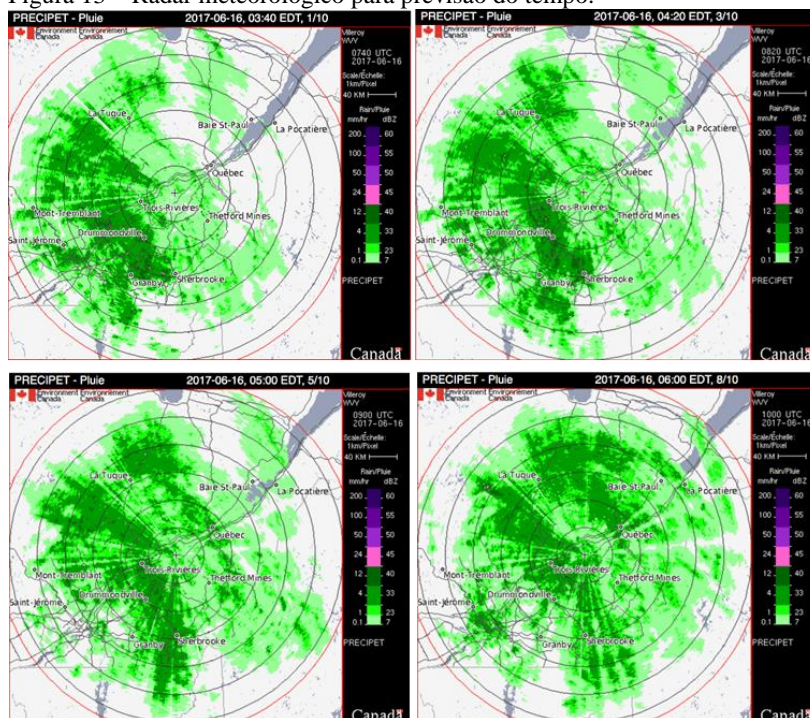
Baseado nos resultados obtidos de uma campanha de monitoramento realizada em 2014 no mesmo local (TIK *et al.*, 2014), foram definidos três períodos para coleta de amostras:

- 1) Entre 04h00 e 08h00, buscando caracterizar as primeiras horas da manhã, quando a população inicia suas atividades e espera-se um aumento do fluxo nos condutos – que durante a madrugada apresenta seus valores mínimos;
- 2) Entre 11h00 e 13h00, buscando caracterizar o período compreendido entre o final da manhã e início da tarde, durante o qual geralmente se observa um pico na vazão transportada, e
- 3) Entre 17h00 e 21h00, buscando caracterizar o período em que grande parte da população retorna para suas residências e retoma parte das atividades antes de ir dormir.

4.2.2 Amostragem em Tempo Úmido (ocorrência de chuva)

Para uma boa caracterização do efeito *first-flush*, durante o qual se prevê uma ressuspensão das partículas sólidas depositadas ao longo de um período de estiagem, buscou-se coincidir o início da coleta das amostras com o início do evento chuvoso. Para tanto, acompanharam-se as informações meteorológicas, fornecidas online pela agência *Environment Canada* (Figura 13).

Figura 13 – Radar meteorológico para previsão do tempo.



Fonte: *Environmental Canada*.

Devido à grande variabilidade entre eventos chuvosos o intervalo e duração de amostragem variou para cada caso.

A Tabela 3 apresenta informações sobre a campanha de amostragem realizada. Cada evento observado resultou em um total de 24 amostras de 900ml cada.

Tabela 3 – Informações sobre a campanha de amostragem realizada.

Data	Período	Intervalo de coleta	Condição climática	Testes realizados
08/06/2017	12h00-14h00	5 minutos	Seco	SST; SSV; ViCAs
09/06/2017	05h30-07h30	5 minutos	Seco	SST; SSV; ViCAs
14/06/2017	11h00-13h00	5 minutos	Seco	SST; SSV; ViCAs
14/06/2017	17h50-20h50	8 minutos	Seco	SST; SSV; ViCAs
15/06/2017	05h15-08h15	8 minutos	Seco	ViCAs
16/06/2017	09h00	“grab sample”		ViCAs
16/06/2017	09h00-11h00	5 minutos	Chuva	SST; SSV; ViCAs
16/06/2017	11h00	“grab sample”		ViCAs

Fonte: do autor.

4.3 Análises Laboratoriais

Uma vez coletadas, as amostras foram transportadas até o laboratório onde foram mantidas refrigeradas por um período de até 24 horas antes do início dos experimentos.

Para cada amostra de 900ml, 150ml foram utilizados nos testes para determinação de SST e SSV, realizados em triplicata e segundo as orientações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Os 750ml restantes de cada amostra foram então transferidos para um recipiente, onde foram homogeneizados e utilizados nos testes para determinação das velocidades de sedimentação das partículas (v_s) respectivos de cada período, realizados por meio do protocolo ViCAs descrito por Chebbo & Gromaire (2009).

Informações complementares a respeito do protocolo ViCAs são apresentadas no tópico 4.3.1 a seguir.

Todas as análises foram realizadas no laboratório do Departamento de Engenharia Civil e Engenharia das Águas (*Génie Civil et Génie des Eaux*) da Universidade Laval, Quebec (Canadá).

4.3.1 Determinação das velocidades de sedimentação das partículas: o teste ViCAs

A determinação das velocidades de sedimentação das partículas (v_s) deu-se por meio da realização do teste ViCAs, segundo o procedimento descrito por Chebbo & Gromaire (2009). Entretanto, diferente-

mente das colunas de 60 centímetros propostas pelos autores, foram utilizadas colunas de 2 metros de altura e diâmetro de 76 milímetros. A utilização de colunas de 2 metros permite a identificação de partículas com menores velocidades de sedimentação.

Os intervalos definidos para retirada e substituição das cúpulas foram: 1min, 3min, 5min, 10min, 20min, 35min, 60min e 120min, contados a partir do início do experimento.

Aqui, a quantificação dos SST para a determinação da fração de massa (%) com velocidade de sedimentação igual ou inferior a v_s também seguiu as orientações propostas por APHA (2012). Foram utilizados filtros com poros de $43\mu\text{m}$ de diâmetro.

A Figura 14 apresenta a coluna utilizada para a realização do teste ViCAs.

Figura 14 – Coluna de sedimentação utilizada no teste ViCAs.



Fonte: do autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estão apresentados os resultados obtidos a partir das análises tanto para tempo seco/ausência de chuva (tópicos 5.1 e 5.2) quanto para tempo úmido/ocorrência de chuva (tópicos 5.3 e 5.4).

5.1 Tempo seco – distribuição da concentração de SST ao longo do tempo

As Figuras 15 a 17 apresentam as distribuições de concentração de sólidos suspensos totais (SST) ao longo dos três períodos observados. Ressalta-se que o gráfico da Figura 16a), embora aqui apresentado, pode ser desconsiderado devido à grandes variações e alto índice de erros (desvio padrão) apresentados.

Figura 15 – Distribuição da concentração de sólidos suspensos totais (SST) durante as primeiras horas da manhã.

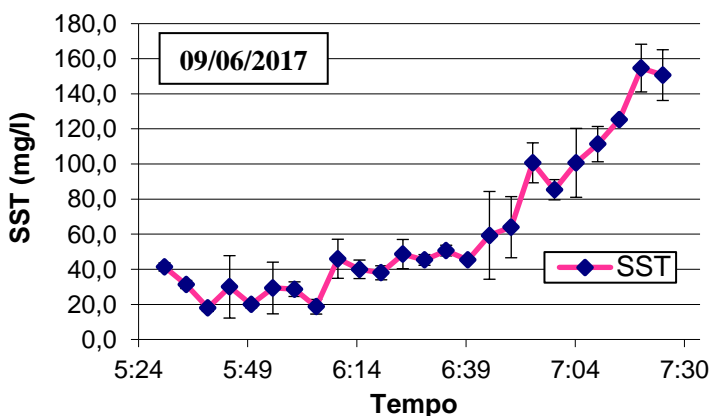


Figura 16 – Distribuição da concentração de sólidos suspensos totais (SST) durante período compreendido entre final da manhã e início da tarde.

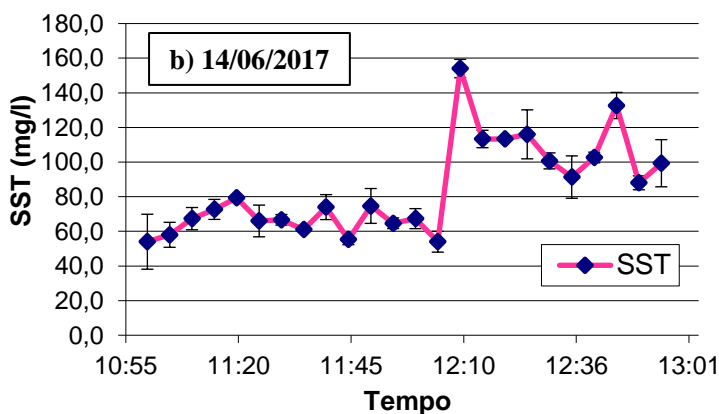
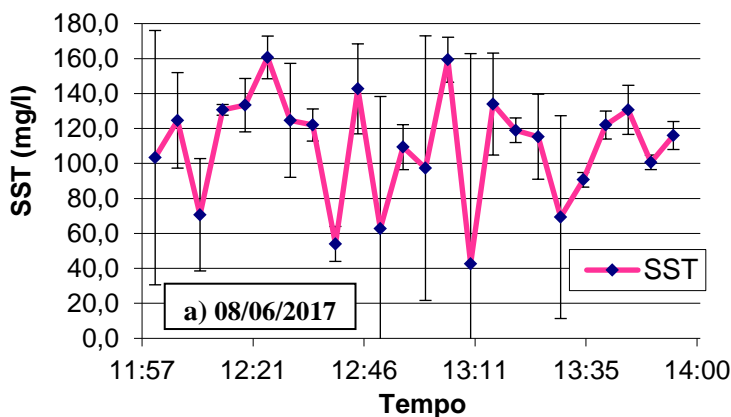
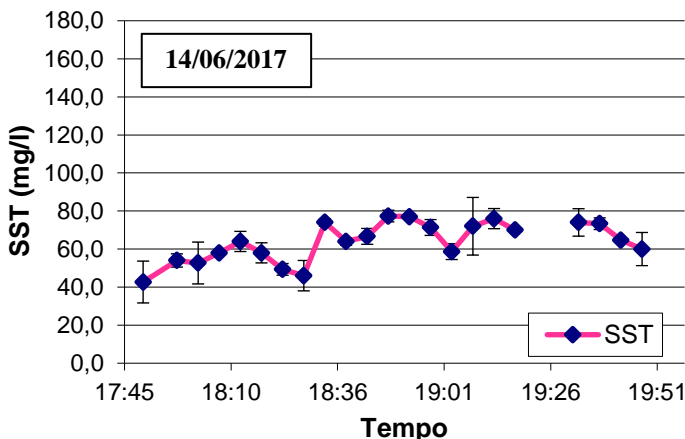


Figura 17 – Distribuição da concentração de sólidos suspensos totais (SST) durante o final de tarde.



Da Figura 15, observa-se um aumento progressivo da concentração de sólidos durante as primeiras horas da manhã – aproximadamente a partir das 06h40 – atingindo seu pico (154,7 mg/l) por volta das 07h20. Este aumento pode ser atribuído a um incremento na vazão – que durante a madrugada atinge seus valores mínimos – conforme o despertar de parte da população: uso dos banheiros/acionamento das descargas, higiene bucal, banhos, etc., o que leva à ressuspensão das partículas que foram depositadas no fundo dos condutos durante a madrugada.

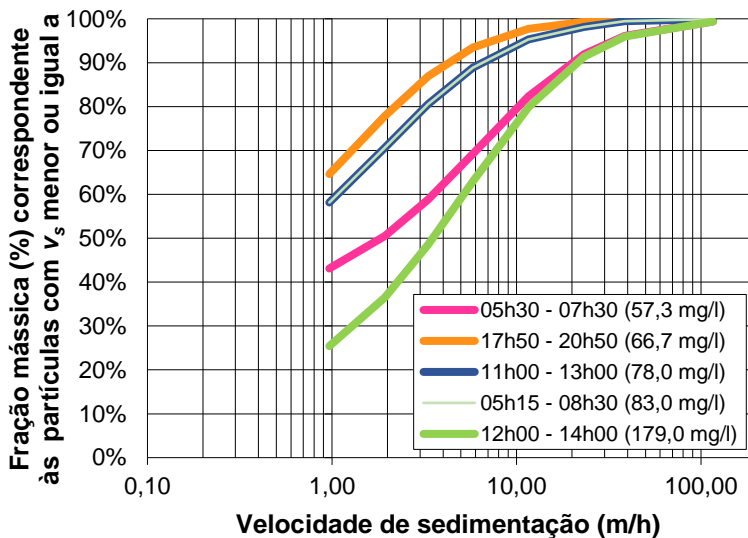
Essa mesma ressuspensão - e consequente aumento da concentração dos sólidos suspensos - é evidenciado na figura 16b), que traz a distribuição da concentração de SST no período compreendido entre o final da manhã e início da tarde, quando se espera um novo aumento do fluxo devido à retomada de parte das atividades (ida ao banheiro, higiene bucal, limpeza das mãos) durante intervalos de almoço. Observa-se, pois, um aumento de aproximadamente 236% na concentração de sólidos suspensos, variando de uma média de 65 mg/l para um pico de 154 mg/l.

A Figura 17, por sua vez, traz a distribuição da concentração durante o final de tarde. Novamente um pico (77,3 mg/l) pode ser observado, entretanto em proporções muito menores (146%) quando comparado aos períodos anteriores.

5.2 Tempo seco – distribuição da velocidade de sedimentação das partículas (v_s)

A Figura 18 apresenta as curvas de distribuição da velocidade de sedimentação das partículas para os períodos analisados.

Figura 18 – Distribuição da velocidade de sedimentação das partículas das amostras coletadas durante os três períodos observados. Em parênteses, a concentração inicial de cada amostra.



Da figura constata-se, via de regra, um deslocamento para baixo das curvas cujas amostras apresentam maior concentração inicial de SST. Isso significa que amostras com elevadas concentrações de SST contém uma maior fração de partículas com elevadas velocidades de sedimentação, confirmando as conclusões apresentadas por Maruejouis (2012) e Bachis *et al.* (2015). Ressalta-se, porém, que para as amostras coletadas entre 05h30 e 07h30, entre 11h00 e 13h00 e entre 05h15 e 08h30, verificaram-se erros de, respectivamente, 51%, 53% e 44% no balanço de massa (determinado pela diferença entre a concentração inicial e final, e concentração de sólidos coletados pelas cúpulas), de forma que seus resultados não são confiáveis. Portanto, as observações que seguem serão feitas apenas em respeito às curvas das amostras coletadas entre 17h50 e

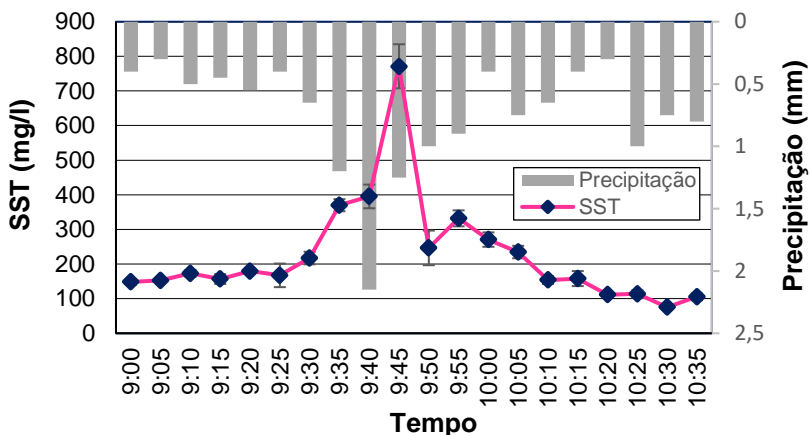
20h50 (erro no balanço de massa = 14%), e entre 12h00 e 14h00 (erro no balanço de massa = 10%).

- a) Para a curva correspondente às amostras coletadas entre 17h50 e 20h50 (concentração inicial = 66,7 mg/l), observa-se que aproximadamente 75% da massa de sólidos possui v_s inferior a 1,6 m/h – velocidade esta considerada no dimensionamento dos tanques de decantação primário da ETE para onde o efluente é encaminhado para tratamento. Isso significa que apenas 25% da massa de sólidos é retida no tratamento primário;
- b) Já para a curva corresponde às amostras coletadas entre 12h00 e 14h00 (concentração inicial = 179,0 mg/l), apenas 33% da massa de sólidos possui v_s inferior a 1,6 m/h, significando que a maioria das partículas que chegarem à ETE serão retidas logo no tratamento primário.

5.3 Tempo úmido (ocorrência de chuva) – distribuição da concentração de SST ao longo do tempo

A Figura 19 apresenta a distribuição de concentração de sólidos suspensos totais (SST) observada durante a ocorrência de um evento chuvoso, bem como a quantidade de chuva, em milímetros, registrada em uma estação pluviométrica posicionada no colégio Félix-Garneau (estação pluviométrica U908), localizado à aproximadamente 2 km do local em estudo.

Figura 19 – Distribuição da concentração de sólidos suspensos totais (SST) durante evento chuvoso e dados de precipitação.

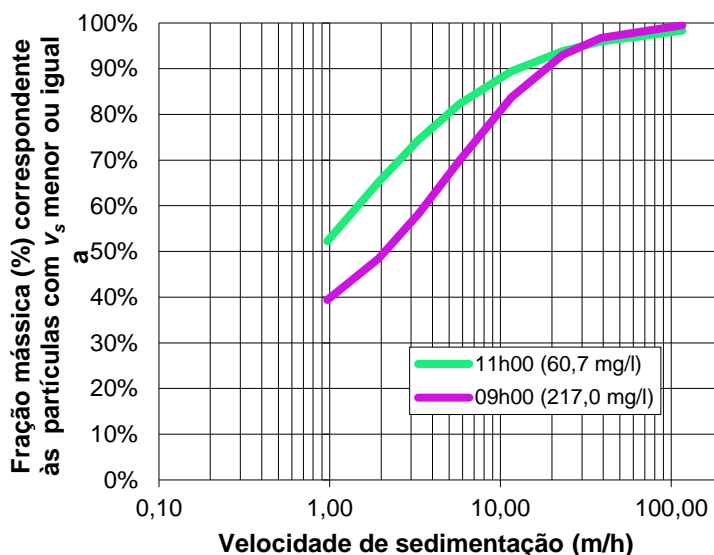


Embora o evento chuvoso em questão tenha tido início às 05h05 – justificando as concentrações elevadas desde a primeira amostra – é evidente a ocorrência do efeito do *first-flush* entre 09h30 e 09h45, quando se observa uma concentração máxima de 771,3 mg/l antes de reduzir novamente. Esse aumento considerável na concentração pode ser atribuído não somente à adição das partículas antes depositadas em superfícies impermeáveis e arrastadas para dentro dos condutos com a água da chuva, mas, principalmente, à ressuspensão das partículas depositadas no fundo destes devido ao aumento da vazão transportada. Observa-se, porém, que logo após atingir seu pico, a concentração cai abruptamente. Essa queda pode ser atribuída ao efeito da diluição: uma vez que as superfícies impermeáveis foram “lavadas” pela chuva, a quantidade de partículas transportadas para dentro dos condutos para a ser desprezível. Similarmente, uma vez que as partículas depositadas no fundo dos condutos foram ressuspensas e transportadas, novas ressuspensões também passar a ser desprezíveis. A partir de então, a inclusão da água da chuva passa a ser um fator de diluição da concentração (ainda que o volume transportado aumente, a massa de sólidos se mantém constante).

5.4 Tempo úmido (ocorrência de chuva) – distribuição da velocidade de sedimentação das partículas (v_s)

A Figura 20 apresenta curvas de distribuição da velocidade de sedimentação das partículas para as duas amostras coletadas durante evento chuvoso para realização do teste ViCAs.

Figura 20 – Distribuição da velocidade de sedimentação das partículas das amostras coletadas durante evento chuvoso. Em parênteses, a concentrações inicial de cada amostra.



Aqui pode-se notar, novamente, um deslocamento para baixo das curvas referentes à amostra com maior concentração inicial de SST (217,0 mg/l) indicando que amostras com elevadas concentrações de SST contém uma maior fração de partículas com elevadas velocidades de sedimentação. Observa-se ainda que para a amostra coletada às 09h00 (antes da ocorrência do efeito do *first-flush*), aproximadamente 53% da massa dos sólidos presentes possui v_s maior que 1,6 m/h e será, portanto, retida no tratamento primário ao passar pela ETE. Já para a amostra coletada às 11h00 (após o efeito do *first-flush*), essa parcela se reduz para aproximadamente 38%, ou seja, 62% da massa das partículas deverá passar pelo tratamento preliminar sem ser retida, seguindo em suspensão pelas etapas subsequentes até ser lançado no corpo hídrico receptor.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

As análises dos dados obtidos ao longo deste trabalho permitiram, sobretudo, verificar o fenômeno da ressuspensão das partículas e consequente aumento na concentração de sólidos suspensos resultantes do aumento da vazão, que causa um aumento na tensão de cisalhamento nas paredes das tubulações, causando a erosão e, consequentemente, a ressuspensão e transporte das partículas ali depositada.

Para as amostras coletadas durante tempo seco, pôde-se ainda confirmar informações de distribuição diária apresentadas em diversas literaturas, as quais apontam um aumento na concentração de SST durante as primeiras horas da manhã, atingindo um primeiro pico por volta do meio-dia e um segundo pico no final da tarde, períodos estes em que grande parte da população retoma suas atividades pessoais (uso de banheiros/acionamento das descargas, banhos, higiene bucal, etc.).

Por sua vez, as análises das amostras coletadas durante ocorrência de chuva permitiram a observação do efeito do *first-flush* – que no evento em questão se deu em aproximadamente quatro horas e meia após o início da chuva – bem como o efeito da diluição.

Em relação às distribuições das velocidades de sedimentação das partículas, pode-se confirmar para ambas as condições climáticas um deslocamento para baixo das curvas cujas amostras apresentaram maior concentração de SST, indicando que amostras com elevadas concentrações contém uma maior fração de partículas com elevadas velocidades de sedimentação e confirmando, assim, as conclusões apresentadas por Maruejols (2012) e Bachis *et al.* (2015). Ressalta-se, porém, que parte dos resultados obtidos apresentou erros consideráveis, chegando à ordem de 50%. Tais erros podem ser atribuídos a falhas durante a realização dos experimentos ViCAs uma vez que uma boa execução exige certa prática, sobretudo durante a retirada e substituição das cúpulas.

O estudo realizado apresentou ainda outras limitações, como o número reduzido de amostras coletadas e analisadas, a falta de dados de vazão, além de problemas técnicos que impediram a correta medição da concentração dos sólidos suspensos voláteis (SSV), cujos resultados duvidosos levaram à decisão da sua não inclusão no presente trabalho.

Por fim, recomenda-se para futuras pesquisas:

- A realização de campanhas de monitoramento de maior duração, tanto para tempo seco quanto para tempo úmido;

- Acompanhamento da variação de vazão para uma melhor comparação com os dados de concentração obtidos das análises laboratoriais;
- Análises da concentração dos SSV para caracterização e comparação da fração orgânica entre amostras coletadas durante tempo seco e úmido;
- Realização de testes ViCAs com maior duração de forma a se observar a fração mássica correspondente às partículas com menores velocidades de sedimentação, e
- Realização dos testes ViCAs também em triplicata, levando assim a um maior grau de confiabilidade dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA, American Public Health Association. (2005). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21 ed. Washington: APHA-AWWA-WEF.

BACHIS, G. *et al.* Modelling and Characterisation of Primary Settlers in View of Whole Plant Modelling and Resource Recovery. **4th IWA/WEF Wastewater treatment Modelling seminar**, v. 1, p. 1–12, 2014.

BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L. *et al.* Comment utiliser la turbidité pour estimer en continu les concentrations en MES et/ou DCO ? **Tsm**, v. 1/2, n. April 2016, p. 36–46, 2010.

CHEBBO, G.; GROMAIRE, M. C. VICAS-An Operating Protocol to Measure the Distributions of Suspended Solid Settling Velocities within Urban Drainage Samples. **Journal of Environmental Engineering-Asce**, v. 135, n. 9, p. 768–775, 2009.

DE FEO, G. *et al.* The Historical Development of Sewers Worldwide. **Sustainability (Switzerland)**, v. 6, n. 6, p. 3936–3974, 2014.

FRADET, O.; PLEAU, M.; MARCOUX, C. Reducing CSOs and giving the river back to the public: Innovative combined sewer overflow control and riverbanks restoration of the St Charles River in Quebec City. **Water Science and Technology**, v. 63, n. 2, p. 331–338, 2011.

HANNOUCHE, A. *et al.* Relationship between Turbidity and Total Suspended Solids Concentration within a Combined Sewer System. **Water Science and Technology**, v. 64, n. 12, p. 2445–2452, 2011.

HERRICK, B. P.; NEUMAYER, A. **Grit Particle Settling – Refining The Approach**. Disponível em: <<https://www.wateronline.com/doc/grit-particle-settling-refining-the-approach-0001>>. Acesso em: março de 2017.

KRISHNAPPAN, B. G. *et al.* A Water Elutriation Apparatus for Measuring Settling Velocity Distribution of Suspended Solids in Combined Sewer Overflows. v. 39, n. 4, p. 432–438, 2004.

LESSARD, P.; BECK, M. B. **Operational Water Quality Management: Control of Storm Sewage at a Wastewater Treatment Plant** *Research Journal of the Water Pollution Control Federation* Water Environment Federation, , 1990.

MARUEJOULS, T. *et al.* Characterization of the Potential Impact of Retention Tank Emptying on Wastewater Primary Treatment: A New Element for CSO Management. **Water Science and Technology**, v. 64, n. 9, p. 1898–1905, 2011.

MARUEJOULS, T.; LESSARD, P.; VANROLLEGHEM, P. **Impact of Particle Property Distribution on Hydrolysis Rates in Integrated Wastewater Modelling**. 13th International Conference on Urban Drainage. *Anais...* Sarawak, Malásia: 2014

MARUEJOUS, T. *et al.* A Phenomenological Retention Tank Model Using Settling Velocity Distributions. **Water Research**, v. 46, n. 20, p. 6857–6867, 2012.

SILVAGNI, G.; VOLPI, F.; CELESTINI, R. Sediment transport in sewers: the Cesarina combined sewer network. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 182, p. 283–295, 2014.

TIBBETTS, J. Combined sewer systems: Down, dirty, and out of date. **Environmental Health Perspectives**, v. 113, n. 7, 2005.

TIK, S. *et al.* Using Particle Settling Velocity Distribution to Better Model the Fate of Stormwater {TSS} Throughout the Integrated Urban Wastewater System. **Influents**, v. 9, p. 48–52, 2014.

TIK, S. **Optimisation de la Performance d'un Système d'Assainissement Unitaire en Temps de Pluie : Modèle Intégré et Contrôle en Temps Réel**. Québec, Canada: [s.n.].

TIK, S. *et al.* **Estimating and Minimizing both CSO and WRRF Discharge Impact by Water Quality Based Control**. WEF Collection Systems Conference 2016. *Anais...* Atlanta, EUA: 2016. Disponível em: <<http://modeleau.fsg.ulaval.ca/fileadmin/modeleau/documents/Publications/pvr1229.pdf>> Acesso em: março de 2017.

TOMAZ, P. **Leis de Stokes**. Disponível em: <http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/livros/livro_remocao/livro_remocao_sedimentos.pdf>. Acesso em: março de 2017.

TORFS, E.; DAIGGER, G. T. Settling Tests. In: M.C.M. VAN LOOSDRECHT, P.H. NIELSEN, C. M. L.-V. AND D. B. (Ed.). **Experimental Methods In Wastewater Treatment**. Londres, Reino Unido: IWA Publishing, 2016. p. 235–262.

VERBANCK, M. **Variabilite des Charhes Solides en Suspension a L'extoire des Réseaux de Collecte**. CB-IAWQ Journee d'étude Fonctionnement du Traitement des Eaux Usees en Cas de Fortes Variations de Debit. **Anais...**Bruxelas, Bélgica: 1995